

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problems Mailbox.**

THIS PAGE BLANK (USPTO)

【書類名】	特許願
【整理番号】	9902335
【提出日】	平成11年 8月26日
【あて先】	特許庁長官殿
【国際特許分類】	H04B 09/00
【発明の名称】	光ファイバ伝送のための方法、光デバイス及びシステム
【請求項の数】	27
【発明者】	
【住所又は居所】	神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内
【氏名】	渡辺 茂樹
【特許出願人】	
【識別番号】	000005223
【氏名又は名称】	富士通株式会社
【代理人】	
【識別番号】	100075384
【弁理士】	
【氏名又は名称】	松本 昂
【電話番号】	03-3582-7477
【手数料の表示】	
【予納台帳番号】	001764
【納付金額】	21,000円
【提出物件の目録】	
【物件名】	明細書 1
【物件名】	図面 1
【物件名】	要約書 1
【包括委任状番号】	9704374
【ブルーフの要否】	要

【書類名】 明細書
 【発明の名称】 光ファイバ伝送のための方法、光デバイス及びシステム
 【特許請求の範囲】

【請求項1】 (a) 分散を有する第1の光ファイバを提供するステップと、

(b) 上記第1の光ファイバに光信号を供給し、上記光信号が上記第1の光ファイバを伝搬するのに従って時間軸上で圧縮されるようにするステップと、

(c) 上記第1の光ファイバから出力された圧縮された光信号を飽和利得を有する光デバイスに供給するステップとを備えた方法。

【請求項2】 請求項1に記載の方法であって、
 上記光デバイスから出力された光信号を第2の光ファイバに供給するステップを更に備えた方法。

【請求項3】 請求項1に記載の方法であって、
 上記第1の光ファイバに沿って少なくとも一つの光増幅器を設けるステップと

、
 上記圧縮された光信号のピークパワーが上記飽和利得を与えるパワーの閾値よりも高くなるように調節するステップとを更に備えた方法。

【請求項4】 請求項1に記載の方法であって、
 上記第1の光ファイバの分散は正常分散であり、
 上記ステップ(b)は上記光信号がダウンチャープを有するようにブリチャーピングを施すステップを含む方法。

【請求項5】 請求項1に記載の方法であって、
 上記第1の光ファイバの分散は異常分散であり、
 上記ステップ(b)は上記光信号がアップチャープを有するようにブリチャーピングを施すステップを含む方法。

【請求項6】 請求項1に記載の方法であって、
 上記ステップ(b)は上記第1の光ファイバの分散及び上記光信号のパワーを適切に設定するステップを含む方法。

【請求項7】 請求項1に記載の方法であって、
 上記第1の光ファイバの分散を補償する分散補償器を上記第1の光ファイバに沿って設けるステップを更に備えた方法。

【請求項8】 請求項2に記載の方法であって、
 上記第2の光ファイバの分散を補償する分散補償器を上記第2の光ファイバに沿って設けるステップを更に備えた方法。

【請求項9】 請求項1に記載の方法であって、
 上記第1の光ファイバの分散が実質的に等分される点の近傍に光位相共役器を設けるステップを更に備えた方法。

【請求項10】 請求項2に記載の方法であって、
 上記第2の光ファイバの分散が実質的に等分される点の近傍に光位相共役器を設けるステップを更に備えた方法。

【請求項11】 光ファイバを伝搬するのに従って時間軸上で圧縮された光信号が供給される光デバイスであって、

入力パワーが増大するのに従って飽和する利得を上記光信号に与える半導体光増幅器を備えた光デバイス。

【請求項12】 請求項11に記載の光デバイスであって、
 上記光信号の波長と異なる波長を有するアシスト光を上記半導体光増幅器に供給する光源を更に備えた光デバイス。

【請求項13】 光ファイバを伝搬するのに従って時間軸上で圧縮された光信号が供給される光デバイスであって、

分布帰還(DFB)レーザと、
 上記DFBレーザが第1の波長で発振するように上記DFBレーザに電流を供給する回路とを備え、

上記光信号は上記第1の波長と異なる第2の波長を有し、それにより上記DFBレーザは入力パワーが増大するのに従って飽和する利得を上記光信号に与える光デバイス。

【請求項14】 請求項13に記載の光デバイスであって、
上記第1の波長と異なる第3の波長を有するアシスト光を上記DFBレーザに供給する光源を更に備えた光デバイス。

【請求項15】 光信号を出力する光送信機と、
上記光信号が伝搬するのに従って時間軸上で圧縮されるように設けられた第1の光ファイバと、
上記第1の光ファイバから出力された圧縮された光信号が供給される飽和利得を有する光デバイスとを備えたシステム。

【請求項16】 請求項15に記載のシステムであって、
上記光デバイスから出力された光信号が供給される第2の光ファイバを更に備えたシステム。

【請求項17】 請求項15に記載のシステムであって、
上記光デバイスは入力パワーが増大するのに従って飽和する利得を上記光信号に与える半導体光増幅器を備えているシステム。

【請求項18】 請求項17に記載のシステムであって、
上記光デバイスは上記光信号の波長と異なる波長を有するアシスト光を上記半導体光増幅器に供給する光源を更に備えているシステム。

【請求項19】 請求項15に記載のシステムであって、
上記光デバイスは、分布帰還(DFB)レーザと、上記DFBレーザが第1の波長で発振するように上記DFBレーザに電流を供給する回路とを備えており、
上記光信号は上記第1の波長と異なる第2の波長を有し、それにより上記DFBレーザは入力パワーが増大するのに従って飽和する利得を上記光信号に与えるシステム。

【請求項20】 請求項19に記載のシステムであって、
上記光デバイスは上記第1の波長と異なる第3の波長を有するアシスト光を上記DFBレーザに供給する光源を更に備えているシステム。

【請求項21】 請求項15に記載のシステムであって、
上記第1の光ファイバに沿って設けられた少なくとも一つの光増幅器を更に備え、
上記圧縮された光信号のピークパワーは上記飽和利得を与えるパワーの閾値よりも高くなるように設定されるシステム。

【請求項22】 請求項15に記載のシステムであって、
上記第1の光ファイバは正常分散を有し、
上記光送信機は上記光信号がダウンチャープを有するようにプリチャージングを施す手段を含むシステム。

【請求項23】 請求項15に記載のシステムであって、
上記第1の光ファイバは異常分散を有し、
上記光送信機は上記光信号がアップチャープを有するようにプリチャージングを施す手段を含むシステム。

【請求項24】 請求項15に記載のシステムであって、
上記第1の光ファイバに沿って設けられ上記第1の光ファイバの分散を補償する分散補償器を更に備えたシステム。

【請求項25】 請求項16に記載のシステムであって、
上記第2の光ファイバに沿って設けられ上記第2の光ファイバの分散を補償する分散補償器を更に備えたシステム。

【請求項26】 請求項15に記載のシステムであって、
上記第1の光ファイバの分散が実質的に等分される点の近傍に設けられた光位相共役器を更に備えたシステム。

【請求項27】 請求項16に記載のシステムであって、

上記第2の光ファイバの分散が実質的に等分される点の近傍に設けられた光位相共役器を更に備えたシステム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は光ファイバ伝送のための方法、光デバイス及びシステムに関する。

【0002】

【従来の技術】

低損失なシリカ光ファイバが開発されたことにより、光ファイバを伝送路として用いる光ファイバ通信システムが数多く実用化されてきた。光ファイバそれ自体は極めて広い帯域を有している。しかしながら、光ファイバによる伝送容量は実際上はシステムデザインによって制限される。最も重要な制限は、光ファイバにおいて生じる波長分散による波形歪みに起因する。光ファイバはまた例えば約 0.2 dB/km の割合で光信号を減衰させるが、この減衰による損失は、エルビウムドープファイバ増幅器 (EDFA) を始めとする光増幅器の採用によって補償されてきた。

【0003】

しばしば単純に分散と称される波長分散は、光ファイバ内における光信号の群速度が光信号の波長 (周波数) の関数として変化する現象である。例えば標準的なシングルモードファイバにおいては、 $1.3 \mu\text{m}$ よりも短い波長に対しては、より長い波長を有する光信号がより短い波長を有する光信号よりも速く伝搬し、その結果としての分散は、通常、正常分散と称される。 $1.3 \mu\text{m}$ よりも長い波長に対しては、より短い波長を有する光信号がより長い波長を有する光信号よりも速く伝搬し、その結果としての分散は異常分散と称される。

【0004】

近年、EDFAの採用による光信号パワーの増大に起因して、非線形性が注目されている。伝送容量を制限する光ファイバの最も重要な非線形性は光カー効果である。光カー効果は光ファイバの屈折率が光信号の強度に伴って変化する現象である。屈折率の変化は光ファイバ中を伝搬する光信号の位相を変調し、その結果信号スペクトルを変更する周波数チャープが生じる。この現象は自己位相変調 (self-phase modulation: SPM) として知られている。SPMによってスペクトルが拡大されることがあり、この場合波長分散による波形歪みが更に大きくなる。

【0005】

このように、光ファイバ通信においては、光ファイバの持つ分散やファイバ内の非線形光学効果による波形劣化が伝送限界の大きな要因となっている。分散の影響は信号帯域が拡大するほど大きくなり、およそ信号速度の二乗に比例して厳しくなる。従って、高速信号においては著しく伝送距離が制限される。これを補償するために各種の分散補償法が考案され、実用化されている。

【0006】

分散による伝送波形歪みを補償する方法としては、分散補償器を用いる方法が最も一般的である。分散補償器としては、絶対値の大きな分散を提供する分散補償ファイバやファイバグレーティング等の補償デバイスが知られている。また、伝送路に正負の分散を交互に並べて実質的にゼロ分散の伝送路を構成する方法や、光位相共役器を伝送路内に配置して伝送路分散による位相変化を補償する方法も分散補償法として知られている。光位相共役器を用いた補償法では、非線形効果も補償可能である。

【0007】

非線形効果の影響を簡易に補償する方法の1つとして、信号にプリチャープを施す方法がある。この方法では、伝送中の非線形効果によりパルスを圧縮して分散によるパルス広がりを補償し、あわせて高い光信号対雑音比 (SNR) を確保して伝送距離を稼ごうというものであり、実用システムにおいて広く採用さ

れている。

【0008】

光パルスは正常分散ファイバ中では波長が長くなる程群速度が速く、異常分散ファイバ中では波長が短いほど群速度が速い。そこで、パルスの立上がり部分において長波長側に波長シフト（負チャープ）し、立下り部分において短波長側にシフト（正チャープ）するようなチャープニング、即ちアップチャープを与えると、異常分散ファイバ内では伝送によりパルス圧縮が起こる。一方、パルスの立上がり部分において短波長側に波長シフト（正チャープ）し、立下り部分において長波長側にシフト（負チャープ）するようなチャープニング、即ちダウンチャープを与えると、正常分散ファイバ内では伝送によりパルス圧縮が起こる。

【0009】

更に、分散補償を行う際に、トータルの分散値をゼロとせず、若干の正常分散あるいは異常分散となるように設定し、この設定の下でプリチャープニングを行うことにより、やはりパルスの圧縮を起こすことが可能である。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】

従来の分散補償法或いはプリチャープニングによる場合、伝送可能距離の拡大が十分でないという問題があった。

【0011】

よって、本発明の目的は、伝送可能距離を拡大することができる光ファイバ伝送のための方法を提供することである。また、そのような方法の実施に適した光デバイス及びシステムを提供することも本発明の目的である。本発明の他の目的は以下の説明から明らかになる。

【0012】

【課題を解決するための手段】

本発明の第1の側面によると、光ファイバ伝送のための方法が提供される。まず、分散を有する第1の光ファイバが提供される。次いで、光信号が第1の光ファイバを伝搬するのに従って時間軸上で圧縮されるように第1の光ファイバに光信号が供給される。そして、第1の光ファイバから出力された圧縮された光信号が飽和利得を有する光デバイスに供給される。

【0013】

このように、本発明による方法では、第1の光ファイバ中で光信号を圧縮させることと圧縮された光信号を飽和利得を有する光デバイスに供給して波形整形を行うこととを組み合わせているので、伝送可能距離の効果的な拡大が可能になる。

【0014】

例えば、光デバイスから出力された光信号は第2の光ファイバに供給される。この場合、本発明による方法では、上述した効果的な組み合わせにより、特に第2の光ファイバによる伝送距離が従来技術による場合と比べて飛躍的に拡大される。

【0015】

望ましくは、第1の光ファイバに沿って少なくとも一つの光増幅器が設けられる。この場合、圧縮された光信号のピークパワーが飽和利得を与えるパワーの閾値よりも高くなるように容易に調節することができる。

【0016】

第1の光ファイバの分散が正常分散である場合には、光信号がダウンチャープを有するようにプリチャープニングを施すことによって、光信号が第1の光ファイバを伝搬するのに従って時間軸上で圧縮され得る。

【0017】

第1の光ファイバの分散が異常分散である場合には、光信号がアップチャープを有するようにプリチャープニングを施すことによって、光信号が第1の光ファイバを伝搬するのに従って時間軸上で圧縮され得る。

【0018】

自己位相変調 (SPM) を利用すると、第1の光ファイバの分散及び光信号のパワーを適切に設定することによっても、光信号が第1の光ファイバを伝搬するのに従って時間軸上で圧縮され得る。

【0019】

第1の光ファイバの分散を補償する分散補償器を第1の光ファイバに沿って設けることができ、また、第2の光ファイバの分散を補償する分散補償器を第2の光ファイバに沿って設けることができる。

【0020】

第1の光ファイバの分散が実質的に等分される点の近傍に光位相共役器を設けることができ、また、第2の光ファイバの分散が実質的に等分される点の近傍に光位相共役器を設けることができる。

【0021】

本発明の第2の側面によると、光ファイバを伝搬するのに従って時間軸上で圧縮された光信号が供給される光デバイスが提供される。この光デバイスは、入力パワーが増大するのに従って飽和する利得を光信号に与える半導体光増幅器を備えている。

【0022】

本発明の第3の側面によると、光ファイバを伝搬するのに従って時間軸上で圧縮された光信号が供給される光デバイスが提供される。この光デバイスは、分布帰還 (DFB) レーザと、DFBレーザが第1の波長で発振するようにDFBレーザに電流を供給する回路とを備えている。光信号は第1の波長と異なる第2の波長を有している。その結果、DFBレーザは入力パワーが増大するのに従って飽和する利得を光信号に与えることができる。

【0023】

本発明の第4の側面によると、光ファイバ伝送のためのシステムが提供される。このシステムは、光送信機、第1の光ファイバ及び光デバイスを備えている。光送信機は光信号を出力する。第1の光ファイバは光信号が伝搬するのに従って時間軸上で圧縮されるように設けられている。第1の光ファイバから出力された圧縮された光信号は光デバイスに供給される。光デバイスは飽和利得を有する。

【0024】

【発明の実施の形態】

以下、添付図面を参照して本発明の望ましい実施形態を詳細に説明する。同様の図を通じて同一の符号は類似又は同様の部品を示す。

【0025】

図1は本発明によるシステムの第1実施形態を示すブロック図である。このシステムは、送信機2と、送信機2に第1の光ファイバ4により接続される利得飽和光アンプ6と、光アンプ6に第2の光ファイバ8により接続される受信機10とを含む。送信機2は符号12で示されるようにパルス状の光信号を第1の光ファイバ4に出力する。第1の光ファイバ4は送信機2から出力された光信号が伝搬するのに従って符号14に示されるように時間軸上で圧縮されるように設けられている。第1の光ファイバ4から出力された圧縮された光信号は、光アンプ6に供給される。光アンプ6は飽和利得を有している。

【0026】

光アンプ6に供給された圧縮された光信号は、光アンプ6により飽和利得を与えられて、パルスのトップ部分が平坦化されることにより波形整形される。波形整形された光信号は符号16で示されるように第2の光ファイバ8に供給され、光ファイバ8により受信機10にまで伝送される。

【0027】

送信機2から出力された光信号は、第1の光ファイバ4を伝搬するのに従って時間軸上で圧縮される。そのために、第1の光ファイバ4が正常分散を有している場合には、送信機2から出力される光信号にはダウンチャープが与えられ、第

1の光ファイバ4が異常分散を有している場合には、送信機2から出力される光信号にはアップチャープが与えられる。

【0028】

このようなダウンチャープ或いはアップチャープのようなプリチャーピングを施すことが可能な図1のシステムに適した送信機の実施形態を図2により説明する。

【0029】

図2に示される送信機は、連続波(CW)光を出力するレーザダイオード等からなる光源18と、変調信号MSを入力するためのポート20と、変調信号MSに基づき、光源18から出力されたCW光を変調して光信号を生成するマッハツェンダ型光変調器(MZ変調器)22とを有している。生成された光信号は、光カプラ24を通してポート26から第1の光ファイバ4へ送出される。

【0030】

MZ変調器22は、光源18に光学的に接続される入力ポート22Aと、光カプラ24に光学的に接続される出力ポート22Bと、入力ポート22AにY分岐28により光学的に結合される一対の光パス30及び32と、光パス30及び32を出力ポート22Bに光学的に結合するためのもう一つのY分岐34とを有している。

【0031】

Y分岐28及び34並びに光パス30及び32は、例えば、 LiNbO_3 等からなる誘電体基板上に予め定められたパターンでTi等を熱拡散させて光導波構造を形成することにより得ることができる。光パス30及び32に電界を印加するために、光パス30及び32上にはそれぞれ接地電極42及び信号電極44が設けられている。信号電極44は例えば進行波形に提供される。入力ポート22Aに光源18から供給されたCW光はまず、Y分岐28においてパワーが実質的に等しい第1及び第2の分岐ビームに分岐される。第1及び第2の分岐ビームはそれぞれ光パス30及び32を伝搬し、Y分岐34で合流する。

【0032】

接地電極42と信号電極44との間に生じる電界が光パス30及び32の屈折率を互いに逆向きに変化させることにより、第1及び第2の分岐ビームの間には位相差が生じ、このように位相差が与えられた第1及び第2の分岐ビームがY分岐34で干渉する結果、変調信号MSに従って強度変調された光信号が出力ポート22Bから出力される。

【0033】

MZ変調器22を駆動し、その動作点を安定化するために、この送信機は、更に、重畳回路46、バイアス回路48、ローパスフィルタ50、位相検出器52、発振器54及びフォトディテクタ(PD)56を有している。

【0034】

また、プリチャーピングを施すために、ポート58に供給された制御信号CSに基づいて動作するチャープパラメータ設定回路60と2つの符号反転回路62及び64とが設けられている。

【0035】

動作点安定化のために、発振器54が出力する周波数 f_0 の低周波信号が用いられる。低周波信号は符号反転回路64を通して重畳回路46に供給される。変調信号MSは、符号反転回路62を通して重畳回路46に供給される。重畳回路46では、低周波信号が変調信号MSに重畳されその結果得られた重畳信号が信号電極44に供給される。重畳回路46は、例えば、利得可変型の増幅器とこの増幅器を信号電極44とAC結合するためのキャパシタとから構成される。符号反転回路62及び64はチャープパラメータ設定回路60により制御される。この制御のより特定の説明は後で行う。

【0036】

動作点が安定化するように制御されたバイアス電圧が、バイアス回路48から

信号電極 4 4 に供給される。その制御を行うために、MZ 変調器 2 2 の出力ポート 2 2 B から出力された光信号の一部が、フォトディテクタ 5 6 により電気信号に変換される。この電気信号には周波数 f_0 の低周波成分が含まれ得る。

【0037】

位相検出器 5 2 は同期検波回路として提供される。位相検出器 5 2 は、発振器 5 4 からの低周波信号とフォトディテクタ 5 6 からの低周波成分との位相比較を行う。その位相比較の結果は位相検出器 5 2 の出力信号の DC 成分に現れるので、その DC 成分がローパスフィルタ 5 0 によって抽出されてバイアス回路 4 8 にフィードバックされる。

【0038】

このフィードバックループにおいては、フォトディテクタ 5 6 からの低周波成分が最小となるようにバイアス回路 4 8 がバイアス電圧を制御する。

【0039】

図 3 を参照すると、図 2 に示される MZ 変調器 2 2 の動作点安定化の原理が示されている。符号 6 5 は MZ 変調器 2 2 への入力電気信号（重畳信号）の波形を示している。MZ 変調器 2 2 の最適な動作点は、符号 6 6 で示されるように、入力電気信号 6 5 の両レベルが最大及び最小の出力光パワーを与える動作特性曲線によって決定される。ここで、動作特性曲線は、光パワーと印加電圧との関係を表すサインカーブによって与えられ、この動作特性曲線が電圧方向にシフトするのが動作点ドリフトである。

【0040】

今、温度変動等により動作特性曲線が 6 8 又は 7 0 で示されるようにシフトすると、出力光信号には低周波成分が生じるようになり、シフトの方向は低周波成分の位相に反映される。即ち、動作特性曲線 6 8 及び 7 0 がそれぞれ与える出力光信号の包絡線の位相は、 180° 異なる。従って、図 2 に示されるように位相検出器 5 2 を用いて同期検波を行うことによって、MZ 変調器 2 2 の動作点が安定化される。

【0041】

次に、図 4 の (A) 乃至 (D) を参照して、符号反転回路 6 2 及び 6 4 を用いたチャープパラメータの切り換えについて説明する。MZ 変調器 2 2 においては、干渉により光スイッチが行われているので、干渉により本質的に生じる波長変動（チャープング）を利用してプリチャープングを行うことができる。プリチャープングは、生成される光信号の 1 パルス内に波長（周波数）の変動を予め与えておくことにより、光ファイバ伝送路における分散及び／又は非線形効果による伝送波形の劣化を抑制するための方法である。

【0042】

MZ 変調器 2 2 の動作特性曲線はサインカーブで与えられるので、安定点となり得る動作点は複数ある。

【0043】

図 4 の (A) を参照すると、MZ 変調器 2 2 の動作特性曲線が示されている。印加電圧として、一つの安定点 V_{b1} の近傍の領域 7 2 を使用して、図 4 の (B) の左側に示されるような正のパルスを与えると、領域 7 2 においては印加電圧 (V) の増大に従って、光パワー (P) が増大するので、図 4 の (C) の左側に示されるように、電圧パルスと同じ極性で光パルスが出力される。このとき、図 4 の (D) の左側に示されるように光パルスの立上がり部分では波長が平均値よりも短くなり立下り部分では長くなる。即ち、一つの光パルスにおいて波長が時間 (t) と共に短波長（高周波数）から長波長（低周波数）へシフトする。この現象はダウンチャープ又はレッドシフトと称される。

【0044】

一方、他の安定点 V_{b2} の近傍の領域 7 4 を使用して、図 4 の (B) の右側に示されるような負の電圧パルスを与えると、領域 7 4 においては印加電圧 (V) の増大に従って光パワー (P) が減少することから、図 4 の (C) の右側に示さ

れるように、電圧パルスとは逆極性で光パルスが出力される。このとき、図4の(D)の右側に示されるように、光パルスの立上がり部分では波長は長波長側にシフトし、立下り部分では短波長側にシフトする。即ち、一つの光パルスにおいて波長が時間(t)と共に長波長(低周波数)から短波長(高周波数)へシフトする。この現象はアップチャープ或いはブルーシフトと称される。

【0045】

光パルスのチャープパラメータ α は、

$$\alpha = 2 (d\Phi / dt) (dS / dt) / S$$

で与えられる。ここで、 Φ は光位相、 S は光強度である。

【0046】

ダウンチャープの場合、チャープパラメータ α は正の値を取り、アップチャープの場合、チャープパラメータ α は負の値を取る。

【0047】

光信号の波長が伝送路として使用される光ファイバのゼロ分散波長よりも短くて正常分散の領域にあるとき、長波長の光は短波長の光よりも光ファイバ中を速く進むので、予め、 $0 < \alpha$ (ダウンチャープ) のプリチャージングを与えておくことによりパルスの圧縮が生じる。逆に、異常分散の領域にあるときには、短波長の光は長波長の光よりも光ファイバ中を速く進むので、予め、 $\alpha < 0$ (アップチャープ) のプリチャージングを与えておくことによりパルスの圧縮が生じる。

【0048】

図2の実施形態では、チャープパラメータ設定回路60が安定点Vb1及びVb2を切り替えることによって、チャープパラメータ α の正負が切換えられる。

【0049】

より特定のには、発振器54から重畳回路46に供給される低周波信号の極性を反転させるために、符号反転回路64が設けられている。符号反転回路64によって低周波信号の極性が切換えられると、重畳回路46に供給される低周波信号の位相が逆転し、その結果、フォトディテクタ56を含むフィードバックループにおける制御の方向が逆になる。これにより、切換え前の安定点が図4の(A)におけるVb1であるとすれば、切り替え後の安定点はVb2となる。その結果、チャープパラメータ α の正負が逆転する。このようにして、ダウンチャープ及びアップチャープを選択することができる。

【0050】

この場合、元の安定点Vb1においては、印加電圧の増大に従って光パワーが増大するが、切換え後の安定点Vb2においては、印加電圧の増大に従って光パワーが減少する。そこで、変調信号MSにおけるハイレベル及びローレベルと、MZ変調器22から出力される光信号におけるハイレベル及びローレベルとの間の関係を同一に保つために、変調信号MSのための符号反転回路62が設けられているのである。

【0051】

図5は図1に示される利得飽和光アンプ6の特性の例を示すグラフである。入力パワー P_{s-in} に対する出力パワー P_{s-out} の変化が示されている。入力パワーの閾値 P_{so} までは、出力パワー P_{s-out} は入力パワー P_{s-in} に比例し、入力パワーが閾値 P_{so} に等しくなるかそれよりも大きくなると、出力パワーは P_{sat} で一定となる。

【0052】

従って、図1に示されるシステムにおいて利得飽和光アンプ6に供給される光信号のピークパワーを P_{so} よりも大きな値に設定することによって、パルスのトップを平坦化して光信号を波形整形することができる。一般に、時間軸上で圧縮されたパルスのピーク付近には最も高速の変調成分が含まれ易い。従って、利得飽和光アンプ6を用いた波形整形により、信号スペクトルの狭帯化が可能である。分散による波形歪みは、スペクトル広がり(ビットレート)の二乗に比例して厳しくなるので、スペクトルの狭帯化を行うことにより波形歪みを低減し、伝送

距離を拡大することができる。

【0053】

利得飽和光アンプ6に光信号が供給されると、その光信号のパルスのピーク付近では立上り及び立下り付近に比べてフォトン数が多くなるため利得飽和が強くなる。この現象を用いると、圧縮された光信号のように振幅揺らぎを持ったパルスのピーク付近の振幅揺らぎを抑圧することができる。利得飽和状態にない光半導体等の光アンプにおいては、吸収回復時間或いはキャリア密度変動の速度制限（通常数GHz）のために入力光信号の速度が制限され、制限速度よりも高速の信号に対しては波形歪みが付加される。これに対して、利得飽和状態にある光アンプにおいては、誘導放出によって過剰なキャリアを活性層で再結合させるため、吸収回復時間を短縮化することが可能である。十分な飽和状態においては、数十ps以下の高速応答となるから、数十ps程度或いはそれ以下の短パルス或いは数十から100Gb/s程度の超高速信号に対しても波形整形が可能である。

【0054】

このように、本発明によると、飽和利得を有する光デバイスを用いて信号光のビットレートやパルス形状等に依存しない簡易な全光波形整形器を提供することができる。また、その波形整形作用と光ファイバ伝送路における光信号の時間軸上での圧縮とを組み合わせることにより、伝送可能距離を拡大することができる。

【0055】

図1に示されるシステムにおいて、伝送距離の拡大が可能になるのは次のように解釈することができる。即ち、本発明が適用されない場合に第2の光ファイバ8のある長さ（或いはある分散）が伝送限界を与えていたとすると、本発明を適用して利得飽和光アンプ6を用いて波形整形を行うことによって、波形整形された光信号の波形及びスペクトルを送信時の波形及びスペクトルに近づけることができ、第1の光ファイバ4の長さ（あるいは分散）分だけ伝送限界を拡大することが可能である。従って、分散に対するトレランスを第1の光ファイバ4内の分散分だけ大きくすることができることになる。分散補償が適用されるシステムにおいては、信号の高速化に伴って分散補償の精度に対する要求が高まっている。これは、分散に対するトレランスがビットレートの二乗に比例して厳しくなるからである。本発明によると、こうした分散トレランスを拡大することができ、システム全体の分散に対するマージンを拡大して、ひいてはシステムのコストダウンが可能になる。

【0056】

図6は本発明による光デバイスの実施形態を示すブロック図である。この光デバイスは図1に示されるシステムにおいて利得飽和光アンプ6として用いることができる。この光デバイスは半導体光増幅器(SOA)66を備えている。光ファイバを伝搬するのに従って時間軸上で圧縮された光信号が、符号68で示されるように、半導体光増幅器66に供給される。

【0057】

半導体光増幅器66は、入力パワーが増大するのに従って飽和する利得を供給された光信号に与えるように、駆動回路70によって駆動電流を与えられている。それにより、供給された光信号の波長が λ_s である場合には、同じく波長 λ_s の波形整形された光信号が、符号72で示されるように、半導体光増幅器66から出力される。

【0058】

但し、半導体光増幅器66は自然放出光(ASE)雑音を放出し、信号のオフレベルにおいては、このASE雑音が主に増幅されるため、特にオフレベルにおいて雑音による劣化が顕著になることがある。そこでこの実施形態では、供給される光信号の波長 λ_s と異なる波長 λ_a を有するアシスト光を半導体光増幅器66に供給するために、光源74が設けられている。これにより、信号のオフレベルにおいても半導体光増幅器66ではアシスト光の増幅に殆どの利得が費やされる

ため、雑音による劣化を小さく抑えることが可能になる。

【0059】

図7は本発明による光デバイスの他の実施形態を示すブロック図である。この光デバイスは図1に示されるシステムにおいて利得飽和光アンプ6として用いることができる。この光デバイスは、レーザ発振可能な波長の範囲として定義される阻止帯域（ストップバンド）を有する分布帰還（DFB）レーザとしてのDFBレーザダイオード（DFB-LD）76を備えている。阻止帯域の幅は例えば0.5乃至1.0nmである。DFB-LD76は、阻止帯域に含まれる波長 λ_0 でレーザ発振するように、駆動回路78によって駆動電流を与えられている。発振の結果得られた発振レーザ光は、符号80で示されるように、DFB-LD76から出力される。発振レーザ光は一般的には連続波（CW）光である。

【0060】

発振状態にあるDFB-LD76は、クランプされた一定の利得を発振レーザ光に関して有している。この発振状態にあるDFB-LD76に、阻止帯域に含まれない波長 λ_s を有する光信号が、符号82で示されるように供給される。供給された光信号はDFB-LD76内で波形整形され、その結果得られた光信号が符号84で示されるようにDFB-LD76から出力される。出力光信号は波長 λ_s を有している。

【0061】

DFB-LD76の駆動は、図示されたように駆動回路78を用いてDFB-LD76に一定の駆動電流（バイアス電流）を供給することにより行い得るが、本発明はこれに限定されず、光ポンピング等の他の方法によりDFBレーザが駆動されても良い。

【0062】

DFB-LD76が電流駆動される場合、その駆動電流を一定値に設定すれば、レーザ発振及び信号増幅に寄与するキャリア総数は一定であり、DFB-LD76から出力される総フォトン数も一定となる。従って、光パルスとして与えられる光信号を入射すると、パルスのピーク付近では立上り及び立下り付近に比べてフォトン数が多くなるため、利得飽和が強くなるという効果が生じる。この効果を用いると、振幅揺らぎを持った光信号のパルスのピーク付近の振幅揺らぎを抑圧することができ、波形整形を行うことができる。

【0063】

このように、本発明のある側面によると、出力飽和特性或いは飽和利得を有するDFBレーザが用いられ、その特性に基き、波形整形して得られた光信号がDFBレーザから出力される。

【0064】

本発明によると、カスケード接続された複数の光増幅器を用いた多段中継伝送システム等において、ASEの累積による振幅雑音の累積を抑圧することも可能である。ASEの累積による波形劣化は、主に信号／ASEビート雑音によるものであり、波形劣化は信号パルスのピーク付近で最も顕著となる。従って、本発明を適用することとなり、このような波形劣化を有効に補償することができる。

【0065】

図7に示される実施形態のようにDFBレーザを用いた場合に、図5に示される特性において、一定の飽和出力パワー P_{sat} が得られる理由は、入力パワー P_{in} が閾値 P_{so} に達するとレーザ発振が停止し、それよりも大きな入力パワーでは利得が飽和して出力パワーが一定になるところにある。従って、光信号がハイレベル及びローレベルを有する光パルスによって与えられている場合には、例えば、ローレベルをゼロレベルに設定し、且つ、ハイレベルを閾値 P_{so} よりも大きな値に設定することによって、光信号のハイレベルでの振幅揺らぎはDFBレーザ内で有効に抑圧され得る。

【0066】

このように本発明のある側面によると、光信号のハイレベルでの振幅揺らぎが

DFBレーザ（或いは利得飽和光アンプ）内で抑圧されるように、光信号のパワーが調節される。しかし、本発明はこれに限定されず、光信号のハイレベルが閾値 P_{so} よりも小さな値に設定されても良い。なぜならば、DFBレーザの動的特性等によっては、閾値よりも小さな入力パワーに対しても出力パワーが飽和する傾向にある場合があるからである。

【0067】

図7に示される実施形態では、圧縮された光信号をDFB-LD76に供給するために、第1の光ファイバ4（図1参照）の出力端とDFB-LD76の第一端とを光学的に結合するための図示しないレンズを使用し得る。また、DFB-LD76から出力された光信号を第2の光ファイバ8に効率良く導入するために、第2の光ファイバ8の入力端とDFB-LD76の第2端とを光学的に結合する図示しないレンズが使用され得る。各レンズは各ファイバの先端を加熱することにより各ファイバと一体に形成され得る。

【0068】

DFB-LD76の阻止帯域は、レーザ発振可能な波長の範囲として定義されるので、発振レーザ光の波長 λ_o は阻止帯域に含まれている。供給されるべき光信号の波長 λ_s は阻止帯域に含まれないことのみによって限定される。

【0069】

図7に示される光デバイスは、アシスト光をDFB-LD76に供給する光源86を付加的に備えている。アシスト光はDFB-LD76の阻止帯域に含まれない波長 λ_A を有している。波長 λ_A は光信号の波長 λ_s に一致するか否かによって限定されないが、後段での信号処理を考慮すると、波長 λ_A は λ_s と異なることが望ましい。

【0070】

アシスト光を用いることにより、特に光信号のローレベルにおいて過剰なノイズの増加を抑えることができ、又、光信号のローレベルが連続する場合に不所望なレーザ発振を防止して光デバイスの動作が安定になる、という技術的效果が生じる。アシスト光が用いられていない場合、光信号のローレベルに累積するASE-ASEビート雑音や伝送波形歪みによるローレベルの乱れを効果的に抑圧することができないことがある。また、光信号のハイレベル及びローレベルの変化に伴ってDFB-LD76の発振状態と発振停止状態とが繰り返されるので、光デバイスの動作が不安定になることがある。

【0071】

この実施形態では、アシスト光は一定のパワーを有している。従って、光信号のローレベルにおいても一定のパワーのアシスト光がDFB-LD76に供給されることとなり、上述した技術的效果が得られるものである。アシスト光のパワーは、例えば光信号のローレベルでの雑音の増加を抑圧するように調節される。

【0072】

図6及び図7に示される実施形態の各々においては、アシスト光が光信号と同じ向きに伝搬するように光源74及び86が設けられているが、アシスト光が光信号と逆向きに伝搬するように光源74及び86の光学的な接続が変更されても良い。

【0073】

図6及び図7に示される実施形態の各々においては、波形整形された光信号を抽出するために、波長 λ_s を含む通過帯域を有する光バンドパスフィルタを用いるのが望ましい。これにより、図6に示される実施形態では光信号をアシスト光と容易に分けることができ、又、図7に示される実施形態では光信号をアシスト光及び発振レーザ光と容易に分けることができる。又、必要に応じて光アンプ及び光アイソレータ等の付加的な光デバイスを設けてもよい。

【0074】

尚、DFBレーザを用いた波形整形に関する付加的な詳細については特願平11-133576号に記載されている。

【0075】

図8は本発明によるシステムの第2実施形態を示すブロック図である。このシステムは、図1に示される第1実施形態と対比して、第1の光ファイバ4の分散を補償する分散補償器88が第1の光ファイバ4に沿って付加的に設けられている点で特徴付けられる。第1の光ファイバ4での伝送中に分散により歪んだ波形は、分散補償器88により補償される。このとき、第1の光ファイバ1及び分散補償器88の分散と、送信機2から出力される光信号に与えられるプリチャージング、光パワー及び分散補償量を適切に設定して、利得飽和光アンプ6に供給される光信号が時間軸上で圧縮されるようにする。そして、利得飽和光アンプ6により波形整形を行った後、第2の光ファイバ8により光信号を受信機10まで伝送する。

【0076】

通常、高い光SNRを確保するためには、できるだけ高いパワーで伝送するのが望ましいが、こうすると非線形効果によりスペクトルが広がり、分散により波形歪みが大きくなる。しかしながら、異常分散とアップチャープとの組み合わせの場合のようにパルス圧縮を与えることにより、波形歪みを少なくして、光SNRを高くすることができる。この場合、パルス圧縮を受けた信号は帯域が拡大しているため、更に伝送をするための波形歪みが特に著しくなるが、本発明に従って最も高速変調成分の多いパルスのトップ部分を平坦化することによりスペクトルを狭め、第2の光ファイバ8における伝送波形歪みをより小さく抑えることにより、伝送距離を拡大することができる。また、分散補償を光アンプによる多段中継伝送に適用した長距離伝送においては、信号光と光アンプのASE雑音光とのビート雑音が伝送距離の制限要因となるが、本発明によればこのビート雑音を抑圧でき、更に伝送距離の拡大が可能となる。

【0077】

図示はしないが、第2の光ファイバ8の分散を補償する分散補償器を第2の光ファイバ8に沿って設けることによって、更なる伝送距離の拡大が可能になる。

【0078】

図9は本発明によるシステムの第3実施形態を示すブロック図である。このシステムは、図1に示される第1実施形態と対比して、送信機2から出力される光信号に与えられるプリチャージング、光パワー、ファイバの分散値及び位相共役器90を設置する位置を適切に設定して、利得飽和光アンプ6に供給される光信号が時間軸上で圧縮されるようにしている点で特徴付けられる。光位相共役器90は例えば第1の光ファイバ4の分散が実質的に等分される点の近傍に設けられる。

【0079】

光位相共役器90は、例えば、非線形光学媒質と、非線形光学媒質において非縮退型の四光波混合により光信号が位相共役変換（波長変換）されるようにポンプ光を非線形光学媒質に供給するポンプ源とから構成することができる。非線形光学媒質として光ファイバが用いられる場合には、その光ファイバのゼロ分散波長にポンプ光の波長を一致させておくことによって、位相整合条件が満たされ易くなり、高い変換効率及び広い変換帯域を得ることができる。

【0080】

光位相共役器90を採用したことにより、第1の光ファイバ4において生じる伝送路分散による位相変化を補償することができることに加えて、光信号の高いパワー等に起因する第1の光ファイバ4内における非線形効果も補償可能である。従って、本発明による効果と相俟って、伝送距離を拡大することができる。また、光位相共役による波形歪補償を光アンプによる多段中継伝送に適用した長距離伝送においては、信号光と光アンプのASE雑音光とのビート雑音が伝送距離の制限要因となるが、本発明によればこのビート雑音を抑圧でき、更に伝送距離の拡大が可能となる。

【0081】

図示はしないが、第2の光ファイバ8の分散が実質的に等分される点の近傍に光位相共役器を付加的に設けても良い。この場合、第2の光ファイバ8における伝送波形歪みをより小さく抑えることができ、伝送距離を更に拡大することができる。

【0082】

図10は本発明によるシステムの第4実施形態を示すブロック図である。このシステムは、図1に示される第1実施形態と対比して、第1及び第2の光ファイバ4及び8の各々に沿って少なくとも一つの光アンプ92が付加的に設けられている点で特徴付けられる。このような多中継伝送システムにおいては、前述したように、本発明を適用することによって、ASEの累積による振幅雑音の累積を抑圧することができる。また、第1の光ファイバ4に沿って設けられる光アンプ92の利得を調節することによって、利得飽和光アンプ6に供給される圧縮された光信号のピークパワーを光アンプ6において飽和利得を与えるパワーの閾値よりも高く設定するのが容易である。

【0083】

以上説明した本発明によるシステムの実施形態では、利得飽和光アンプ6は送信機2と受信機10とを結ぶ光ファイバ伝送路の途中に設けられている。従って、利得飽和光アンプ6は、全光2R再生中継器或いは全光3R再生中継器の波形整形セクションとして用いることができる。図示はしないが、第2の光ファイバ8を省略して、利得飽和光アンプ6を受信機内に設けても良い。

【0084】

本発明はWDM（波長分割多重）と組み合わせて実施しても良い。例えば、図1に示されるシステムにおいては、利得飽和光アンプ6により全チャネルを一括して補償することができる場合には、図1に示されるシステムをそのままWDMに適用することができる。WDMのチャネル間クロストーク等の影響により1台の利得飽和光アンプ6で全チャネルを一括して補償することができない場合には、第1の光ファイバ4により伝送されたWDM信号光を例えば光デマルチプレクサを用いてチャネルごとに或いは適当な数の複数のチャネルごとに分岐した後、複数の利得飽和光アンプを用いて各チャネルごとに或いは適当な数の各複数のチャネルごとに波形整形を行ってその後光マルチプレクサを用いて合流して第2の光ファイバ8により伝送するようにすれば良い。

【0085】

続いて、本発明の実証実験について図11乃至図14により説明する。

【0086】

図11は実証実験に用いたシステムのブロック図である。波長1558nmの信号光（Signal）を電界吸収（EA）型変調器（EA mod.）を用いて10GHzの正弦波で強度変調し、更にLN変調器（LN mod.）を用いて10Gb/sのランダム信号（PN：2²³⁻¹）で変調した。生成されたパルスは幅約30psのRZパルスであった。

【0087】

このRZ変調パルスを長さ20km、分散約+16ps/nm/kmの単一モードファイバ（Fiber-1）で伝送後、波長1540nmのアシスト光（Assist）と合波した後、利得飽和光アンプ或いは利得クランプト光アンプとしてのDFB-LDに入力した。このとき、DFB-LDに入力したアシスト光のパワーは約15mWであった。DFB-LDの駆動電流は400mAであり、発振波長は1550nm、発振パワーは約40nWであった。DFB-LDから出力した信号光は、Fiber-1と同じ分散を持ち、長さLの単一モードファイバ（Fiber-2）で伝送した後、受信機（Receiver）により受信した。

【0088】

図12は実験で用いられたDFB-LDの入力パワー P_{sin} に対する出力パワー P_{sout} の変化の測定結果を示すグラフである。この測定では、変調されてい

い信号光を用いた。入力が約 8 mW 以上で出力パワーが飽和していることがわかる。

【0089】

次に、変調された RZ パルスに対して、そのピークパワーが上述の測定された閾値 8 mW を十分超えるように設定を行って、伝送実験を行った。波形の変化の様子を図 13 の (A) ~ (E) に示す。(A) はオリジナルの波形、(B) は DFB-LD の入力波形、(C) は DFB-LD の出力波形、(D) は DFB-LD による波形整形を行わなかった場合における $L = 40 \text{ km}$ での受信波形、(E) は DFB-LD による波形整形を行った場合における $L = 40 \text{ km}$ での受信波形である。DFB-LD を用いた波形整形により、パルスのピーク付近が若干縦方向に潰されており、40 km 伝送における波形整形による波形の劣化抑制の効果が顕著に見られた。DFB-LD を通さない場合には、分散と非線形効果により著しく波形が歪んでいるが (D)、DFB-LD を通すことにより、その歪みが抑圧されているのが明白である (E)。

【0090】

図 14 に伝送距離に対するパワーペナルティ ($\text{BER} = 10^{-9}$) の変化の様子を示す。DFB-LD を用いることにより、伝送距離が 15 乃至 20 km 拡大していることがわかる。即ち、本発明による方法により、分散補償無しに DFB-LD を設けた点の前 20 km 分伝送距離を拡大可能であることが確認された。

【0091】

本発明の方法による効果はビットレートやパルス形状に依存しない。実際、この実験で用いた 30 ps の RZ パルスは 30 Gb/s 以上のビットレートに相当するものであり、十分高速伝送に適用可能であることが明らかである。本発明は簡易な方法でありながら、伝送距離を (分散補償無しに) 拡大可能である。また、システムの分散に対するトレランスを拡大可能であり、特に高ビットレートにおいて大きな問題となる分散補償の厳しい設定精度を緩和可能である。

【0092】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明によると、伝送可能距離を拡大することができる光ファイバ伝送のための方法の提供が可能になるという効果が生じる。また、そのような方法に適用可能な新規な光デバイス及びシステムの提供が可能になるという効果もある。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

図 1 は本発明によるシステムの第 1 実施形態を示すブロック図である。

【図 2】

図 2 は本発明によるシステムに適用可能な送信機の実施形態を示すブロック図である。

【図 3】

図 3 は動作点安定化の原理を説明するための図である。

【図 4】

図 4 の (A) ~ (D) はチャープパラメータの切り替えを説明するための図である。

【図 5】

図 5 は利得飽和光アンプの特性の例を示すグラフである。

【図 6】

図 6 は本発明による光デバイスの実施形態を示すブロック図である。

【図 7】

図 7 は本発明による光デバイスの他の実施形態を示すブロック図である。

【図 8】

図 8 は本発明によるシステムの第 2 実施形態を示すブロック図である。

【図 9】

図 9 は本発明によるシステムの第 3 実施形態を示すブロック図である。

【図 1 0】

図 1 0 は本発明によるシステムの第 4 実施形態を示すブロック図である。

【図 1 1】

図 1 1 は実証実験に用いたシステムのブロック図である。

【図 1 2】

図 1 2 は実験で用いた DFB-LD の特性を示すグラフである。

【図 1 3】

図 1 3 の (A) ～ (E) は実験結果を示す波形図である。

【図 1 4】

図 1 4 は実験におけるパワーペナルティの改善を示すグラフである。

【符号の説明】

- 2 送信機
- 4 第 1 の光ファイバ
- 6 利得飽和光アンプ
- 8 第 2 の光ファイバ
- 1 0 受信機

【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 本発明は光ファイバ伝送のための方法、光デバイス及びシステムに関し、伝送可能距離を拡大することが主な課題である。

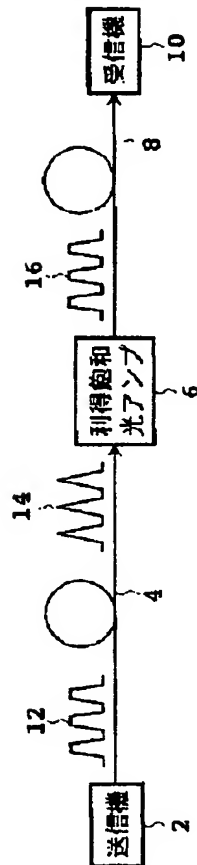
【解決手段】 本発明は伝送距離を拡大することが出来る光ファイバ伝送のための方法に関連している。まず、分散を有する第1の光ファイバ4が提供される。次いで、光信号が第1の光ファイバ4を伝搬するのに従って時間軸上で圧縮されるように、第1の光ファイバに光信号が供給される。例えば分散が正常分散である場合には、光信号がダウンチャープを有するようにプリチャージングが施される。そして、第1の光ファイバ4から出力された圧縮された光信号が飽和利得を有する光デバイス6に供給される。この方法によると、光信号が圧縮されることと光デバイスによる波形整形との効果的な組み合わせにより伝送距離が拡大される。

【選択図】 図1

【書類名】
【図 1】

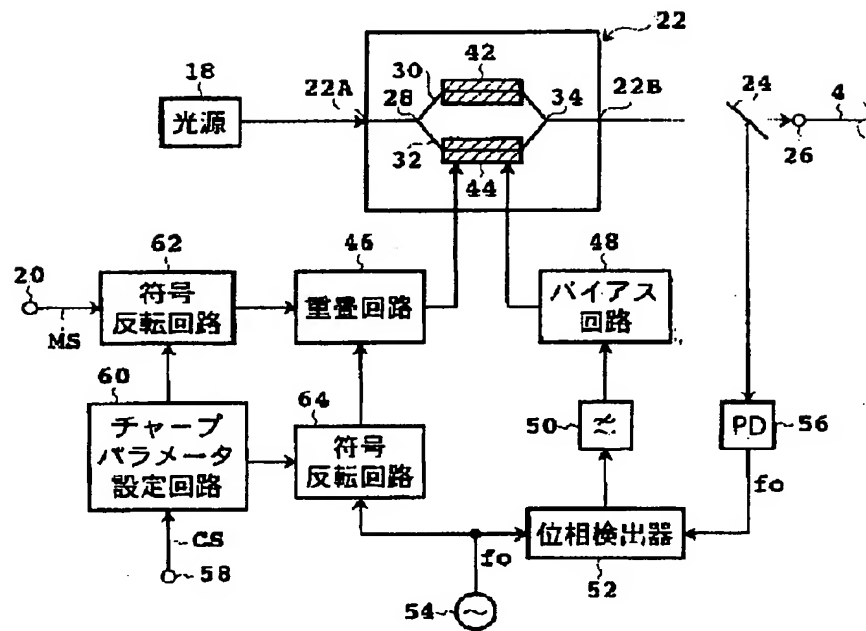
図 面

本発明によるシステムの第1実施形態を示すブロック図



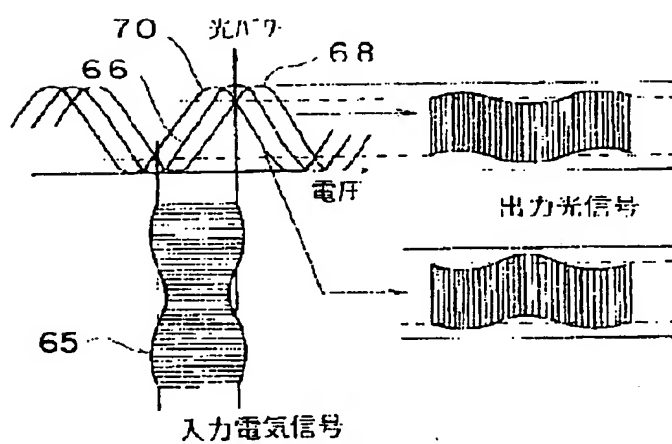
【図 2】

送信機の実施形態を示すブロック図



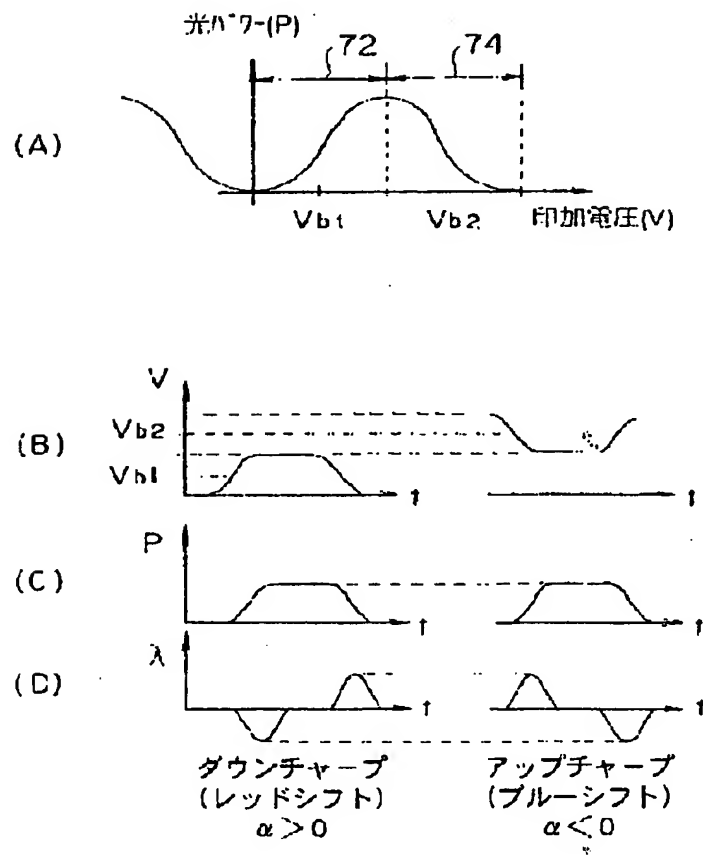
【図3】

動作点安定化の原理を説明するための図



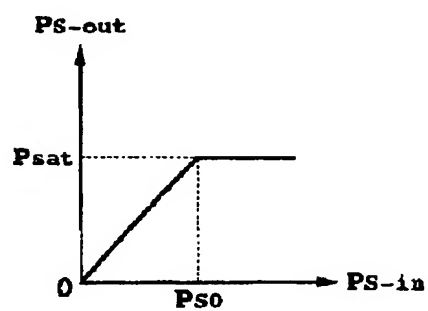
【図 4】

チャープパラメータの切替を説明するための図



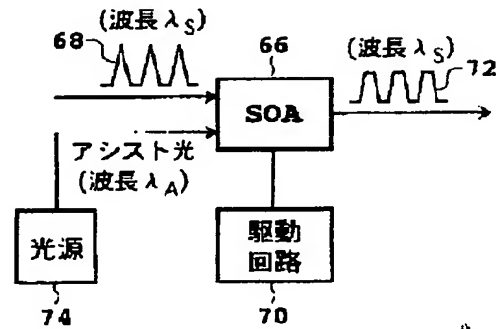
【図5】

利得飽和光アンプの特性の例を示すグラフ



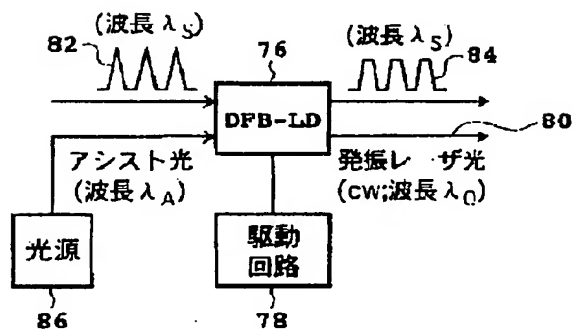
【図 6】

本発明による光デバイスの実施形態を示すブロック図



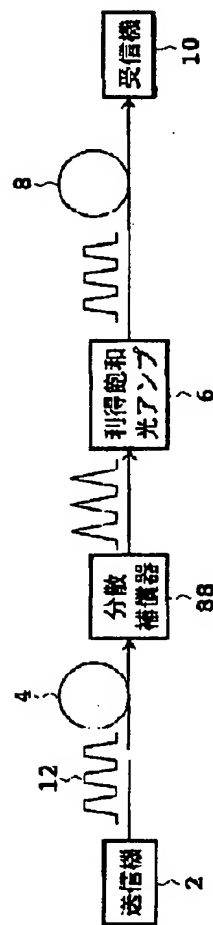
【図 7】

本発明による光デバイスの
他の実施形態を示すブロック図



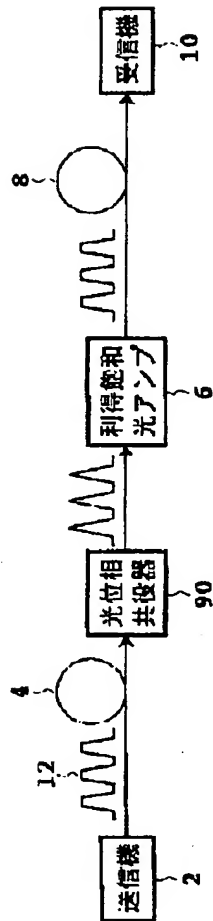
【図 8】

本発明によるシステムの第2 実施形態を示すブロック図



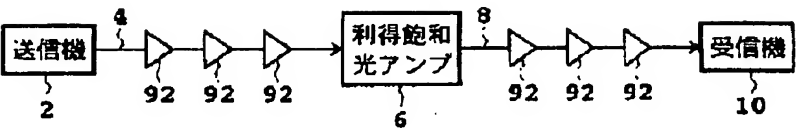
【図 9】

本発明によるシステムの第3実施形態を示すブロック図



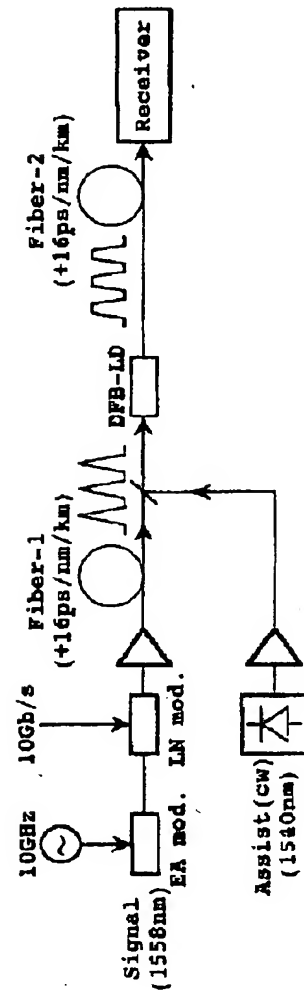
【図 10】

本発明によるシステムの第 4 実施形態を示すブロック図



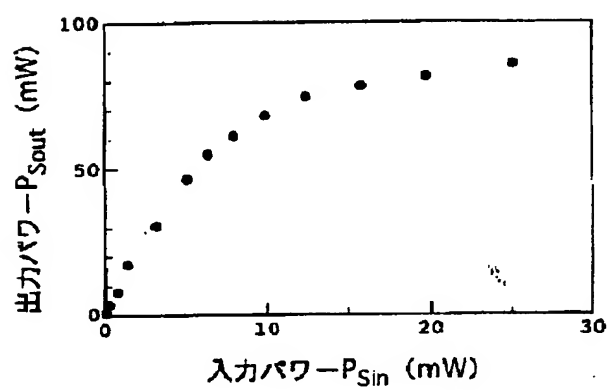
【図 1 1】

実証実験に用いたシステムのブロック図



【図 1 2】

実験で用いたDFB-LDの特性を示すグラフ



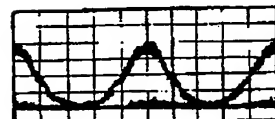
【図 1 3】

実験結果を示す波形図

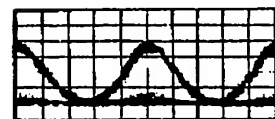
(A)



(B)



(C)



(D)

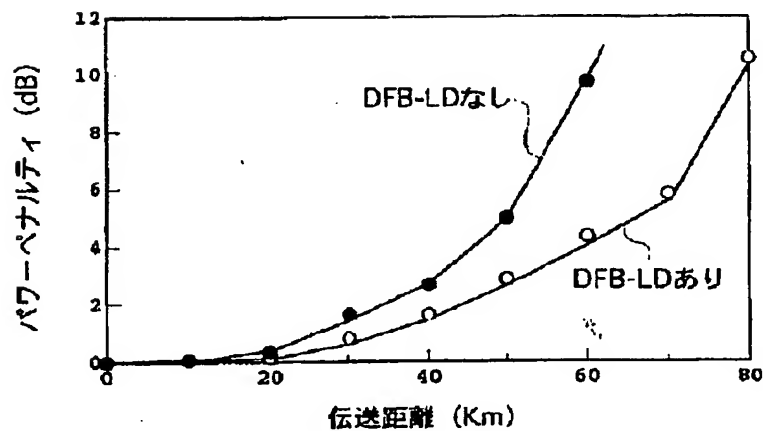


(E)



【図 1 4】

実験におけるパワーペナルティの改善を示すグラフ



THIS PAGE BLANK (USPTO)